

Fenómenos de resonancia asociados al transporte de mercancías líquidas por ferrocarril

C. Vera, B. Suarez, J. Paulin y M. Gutierrez

Los vagones de mercancías se unen entre sí mediante acoplamientos UIC estándar. Aunque cada plataforma está equipada con un tensor de enganche en ambos extremos, sólo uno de ellos se utiliza, mientras que el otro descansa apoyado en un gancho. Debido a los efectos de oleaje del líquido contenido en las cisternas, este tensor en reposo puede entrar en resonancia con la frecuencia natural de algunos fluidos, llegando a oscilar de forma apreciable. En ocasiones llega a saltar fuera de su alojamiento, provocando ciertas molestias durante la circulación, aunque sin entrañar ningún riesgo para la seguridad de la marcha. Con el propósito de simular la influencia de diversos factores sobre el comportamiento dinámico asociado a estos fenómenos de oleaje, se ha desarrollado un modelo de la interacción fluido-vehículo, empleado técnicas de modelado de sistemas multicuerpo y de elementos finitos.

Esta es una versión electrónica de un artículo publicado en las Actas del II Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Plasencia, España, 17-18 Enero, 2006.

Para citar este artículo, hacer referencia al artículo publicado:

C. Vera, B. Suarez, J. Paulin y M. Gutierrez, Fenómenos de resonancia asociados al transporte de mercancías líquidas por ferrocarril. Actas del II Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Plasencia, España, 17-18 Enero, 2006.

Fenómenos de resonancia asociados al transporte de mercancías líquidas por ferrocarril

CARLOS VERA¹, BERTA SUAREZ^{2,3}, JENNY PAULIN³ y MARIANO GUTIERREZ⁴

IN MEMORIAM CARLOS VERA ÁLVAREZ

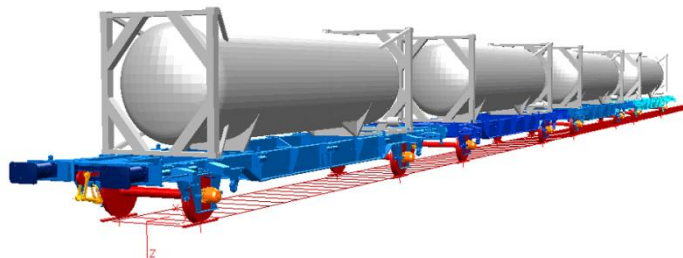


No quisiéramos comenzar este artículo sin antes incluir unas líneas en memoria de nuestro muy querido amigo y maestro Carlos Vera, que nos dejó tan prematuramente la tarde del 21 de noviembre de 2005.

Singular aragonés y hombre sin igual, a quien echaremos muchísimo en falta y siempre recordaremos con especial cariño. Esperamos que su mirada siga iluminándonos desde el cielo, y que su recuerdo nos conforte en los momentos difíciles.

RESUMEN

Los vagones de mercancías se unen entre sí mediante acoplamientos UIC estándar. Aunque cada plataforma está equipada con un tensor de enganche en ambos extremos, sólo uno de ellos se utiliza, mientras que el otro descansa apoyado en un gancho.



Debido a los efectos de oleaje del líquido contenido en las cisternas, este tensor en reposo puede entrar en resonancia con la frecuencia natural de algunos fluidos, llegando a oscilar de forma apreciable. En ocasiones llega a saltar fuera de su alojamiento, provocando ciertas molestias durante la circulación, aunque sin entrañar ningún riesgo para la seguridad de la marcha.

Con el propósito de simular la influencia de diversos factores sobre el comportamiento dinámico asociado a estos fenómenos de oleaje, se ha desarrollado un modelo de la interacción fluido-vehículo, empleado técnicas de modelado de sistemas multicuerpo y de elementos finitos.

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

² Autor de contacto: Berta Suárez Esteban, CITEF – ETSI Industriales, C/ José Gutiérrez Abascal nº 2, 28006, Madrid, e-mail: citef.bsuares@etsii.upm.es.

³ CITEF – Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias.

⁴ Renfe Operadora – Unidad de Negocio de Mercancías.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, el CITEF (Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias), adscrito a la Universidad Politécnica de Madrid, ha adquirido gran experiencia en el desarrollo de modelos detallados de vehículos ferroviarios utilizando el programa de simulación de sistemas multicuerpo, SIMPACK, y el programa de cálculo por elementos finitos, ANSYS.

El trabajo presentado en este artículo es el resultado de la colaboración científica entre el CITEF y Renfe Operadora.

1.1. Trenes de mercancías para el transporte de contenedores cisterna

Se ha modelado un tren de mercancías con vagones típicos de dos ejes para el transporte de contenedores cisterna, con el máximo grado de llenado permitido.

Cuando el vehículo comienza a moverse, el fluido contenido en la cisterna experimenta un movimiento oscilatorio. La peculiaridad del movimiento del fluido en tanques parcialmente llenos se conoce con el nombre de oleaje. Es sabido que en casi todos los sistemas de transporte, este oleaje se superpone al movimiento del vehículo y ocasionalmente puede provocar situaciones críticas que, en el caso del transporte ferroviario, pueden conducir al descarrilamiento del tren o incluso al vuelco de los contenedores al circular por curvas cerradas.

Las técnicas de modelado de vehículos ferroviarios mediante herramientas de alto nivel, aptas para la simulación de sistemas multicuerpo son bien conocidas. Sin embargo, al tener que combinar las ecuaciones que rigen el comportamiento del vehículo con las complejas ecuaciones de la mecánica de fluidos (Navier-Stokes), el proceso de modelado se complica bastante y requiere elevados tiempos de cálculo.

En los siguientes apartados se describen, tanto el modelo de vehículo, como la técnica empleada para incorporar las cargas asociadas al movimiento de oleaje del líquido, mediante la utilización de modelos simplificados de 1 gdl.

2. DESARROLLO DEL MODELO DE VEHÍCULO

El modelo final del vehículo corresponde a una composición de vagones de dos ejes, unidos entre sí por acoplamientos estándar tipo UIC, situados entre los topes. Cada vagón incluye los siguientes componentes, que han sido modelados como sólidos rígidos en SIMPACK: 2 ejes montados, 4 cajas de grasa, 1 plataforma, 2 cuerpos para cada contenedor-cisterna cargado y 14 para el sistema de choque y enganche.

2.1. Modelo detallado

Inicialmente se construyó un modelo detallado del tren. Se incluyeron cuatro vagones, al considerarse este número suficiente para representar el comportamiento de la composición real. Este modelo detallado tenía en conjunto 117 gdl.

Al incluir muchos detalles, se esperaba que los resultados obtenidos representasen fielmente el comportamiento del vehículo real. Se incluyeron varias características que se describirán a continuación.

- **Perfiles de rodadura de la rueda y el carril**
- **Suspensión UIC de ballestas**: se ha modelado con muelles y amortiguadores convencionales que actúan en las tres direcciones (longitudinal, lateral y vertical).

Se han incluido también topes verticales y longitudinales, que limitan el desplazamiento relativo entre la plataforma y los ejes montados.

- **Topes**: las fuerzas de contacto y de fricción entre dos topes adyacentes se han simulado mediante muelles de contacto, que sólo dan lugar a una fuerza no nula cuando los dos topes se tocan. Se han incluido también los muelles internos de goma del tope, que atenúan el impacto cuando los topes chocan entre sí.
- **Tensores de enganche**: se han modelado como mecanismos articulados de 3 barras, unidas entre sí por juntas que permiten el giro en torno al eje lateral (ver Fig. 1). Se han incluido en el modelo las pérdidas por fricción asociadas a cada movimiento. Al emplear un tensor de enganche, su extremo se aloja en el gancho de tracción adyacente, y se rosca el husillo del tensor a fin de acortarlo lo suficiente para acercar los vagones entre sí. En el modelo, la fuerza de tracción ejercida por este tensor se ha modelado mediante un muelle con gran rigidez en todas las direcciones. El tensor de enganche del otro vagón no se utiliza, y se cuelga de un pequeño gancho fijado al bastidor. Para el tensor en reposo, se ha incorporado también un modelo de contacto que simula su posicionamiento en dicho gancho.
- **Ganchos de tracción**: se ha incluido en el modelo el muelle interno de goma que atenúa las fuerzas longitudinales que aparecen en el gancho de tracción al acoplar entre sí dos vagones.
- **Contenedores-cisterna**: existe una holgura entre la plataforma y los contenedores cisterna, que permite el desplazamiento longitudinal. En el modelo, se han empleado topes longitudinales para limitar este movimiento. Se han incluido también en el modelo las pérdidas por fricción asociadas.

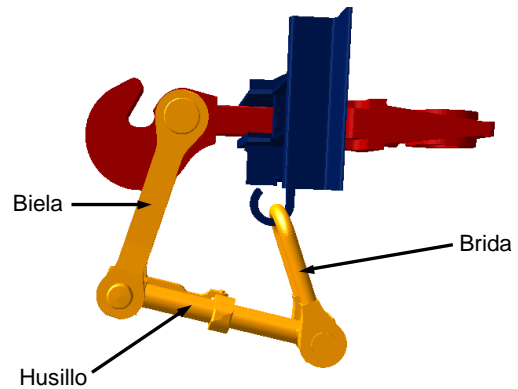


Fig. 1 Componentes del tensor de enganche en reposo

Seguidamente, se ha incorporado en el modelo de vehículo un modelo equivalente para el fluido, que se describe en la sección 3. Después se han ejecutado las simulaciones, obteniéndose los primeros resultados. Sin embargo, debido a la gran cantidad de detalles incluidos en el modelo inicial, el tiempo de cálculo resultaba demasiado alto, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad para encontrar cuáles de los detalles anteriormente descritos podría despreciarse sin alterar los resultados de forma significativa. De este modo se construyó un modelo reducido.

En el siguiente apartado se describen brevemente las características que han sido despreciadas en el modelo reducido.

2.2. Modelo reducido

Tras llevar a cabo varias simulaciones comparativas, se ha encontrado que la presencia o ausencia de ciertos detalles no altera el comportamiento del vehículo objeto de estudio. Por tanto, se ha simplificado el modelo de la siguiente forma:

Topes:

Sin muelles internos

Tensor de enganche en uso:	Las tres barras se han fundido en una sola
Ganchos de tracción:	Sin muelles internos de goma
Contenedores cisterna	Sin holgura longitudinal

El modelo reducido de cuatro vagones tiene el mismo número de cuerpos rígidos que el modelo detallado (124 cuerpos), pero sólo 79 gdl. La eliminación de grados de libertad y elementos de fuerza reduce significativamente los tiempos de cálculo.

3. DESARROLLO E INCORPORACIÓN DEL MODELO DE LÍQUIDO

Los trenes de mercancías para el transporte de cisternas están sujetos al fenómeno de oleaje, término que alude a la oscilación del líquido contenido en la cisterna cuando está parcialmente llena. El movimiento de oleaje se simula habitualmente por medio de sofisticados algoritmos de cálculo por elementos finitos capaces de formular y resolver las complejas ecuaciones de la mecánica de fluidos, tales como las de Navier-Stokes. Dada la dificultad de integrar estos modelos de flujo del líquido en un programa de simulación de sistemas multicuerpo, se ha buscado un modelo equivalente capaz de representar el oleaje del fluido y su interacción con el vehículo.

Es sabido [6] que sólo la primera frecuencia natural del líquido transportado en una cisterna resulta importante para el estudio del fenómeno de oleaje. Por tanto, los modelos equivalentes apropiados son aquellos de un grado de libertad, como un péndulo o un modelo masa-muelle. Es este estudio, el modelo de masa puntual con un grado de libertad se ha utilizado para estudiar el comportamiento longitudinal de los trenes de mercancías durante las maniobras de frenado y aceleración.

3.1. Modelo de oleaje longitudinal

Abramson [6] desarrolló un modelo de masas y muelles con un grado de libertad, que se ajusta al comportamiento de un líquido contenido en un tanque de sección rectangular. En la Fig. 2 se muestran las masas m_1 y m_0 que representan, respectivamente, la fracción del fluido que se desplaza longitudinalmente, y la que permanece inmóvil.

También propuso un conjunto de ecuaciones que permiten calcular los valores de las masas equivalentes, sus correspondientes alturas y la rigidez de los muelles:

$$m_t = \rho \cdot h \cdot w \cdot b; \quad m_1 = m_t \cdot \left(\frac{w}{3,87 \cdot h} \right) \cdot \tanh \left(3,14 \cdot \frac{h}{w} \right); \quad m_0 = m_t - m_1$$

$$k_1 = m_t \cdot \left(\frac{g}{1,23 \cdot h} \right) \cdot \left(\tanh \left(3,14 \cdot \frac{h}{w} \right) \right)^2$$

$$l_1 = \frac{w}{1,57} \cdot \tanh \left(1,57 \cdot \frac{h}{w} \right); \quad l_2 = \frac{h}{2} + \frac{m_1}{m_0} \cdot \left(\frac{h}{2} - l_1 \right)$$

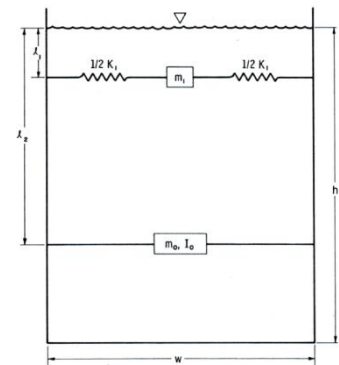


Fig. 2 Modelo masa-muelle

donde m_t es la masa total del líquido; ρ la densidad; h la altura de la superficie libre; w la longitud del tanque rectangular; b el ancho del tanque rectangular (no mostrado en la figura) y g la aceleración de la gravedad. Y donde las incógnitas son: m_1 , masa móvil; m_0 , masa fija; k_1 , rigidez del muelle; l_2 , distancia de la masa fija a la superficie libre; l_1 , distancia de la masa móvil a la superficie libre.

La solución de las ecuaciones depende de la sección rectangular del tanque y de su longitud total, así como de la densidad del líquido y del grado de llenado. Dado que los contenedores cisterna analizados en este trabajo son de sección circular, se ha llevado a cabo un estudio para determinar qué sección rectangular se adapta mejor a la sección circular real, tanto cualitativa como cuantitativamente. A tal fin, se han desarrollado modelos tridimensionales con el programa de cálculo por elementos finitos ANSYS, y se han comparado los resultados correspondientes a tanques con sección circular y con secciones rectangulares de diferentes dimensiones.

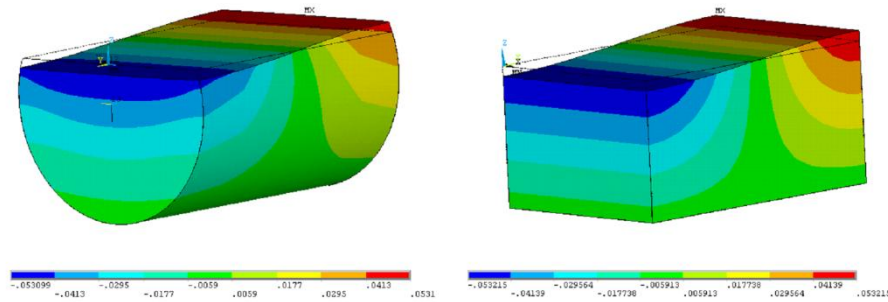


Fig. 3 Modelos tridimensionales de elementos finitos con ANSYS

Se han analizado varias secciones rectangulares de diferentes dimensiones. Se ha comprobado que la sección rectangular que proporciona resultados más próximos a los del tanque cilíndrico es aquella que se encuentra entre el rectángulo inscrito y el circunscrito a la sección circular. En la Fig. 4, se muestra la sección circular con línea discontinua, y la sección rectangular media con trazado grueso, en color azul.

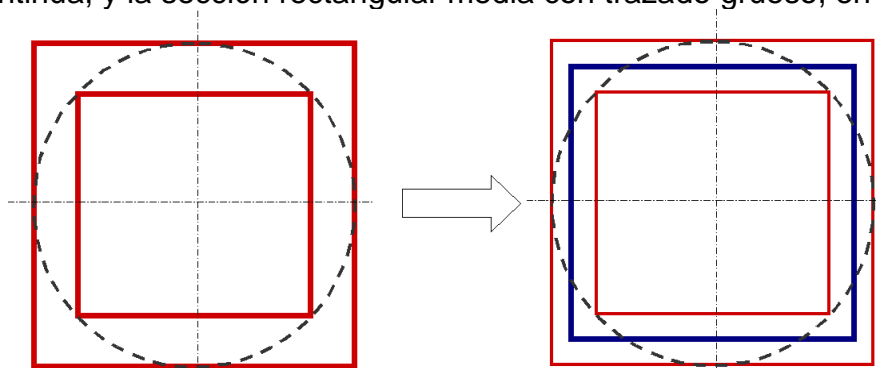


Fig. 4 Secciones transversales inscrita, circunscrita y circular (izda.), sección rectangular media (derecha, línea gruesa)

Se han comparado la primera frecuencia natural de oleaje y las fuerzas de reacción longitudinales sobre las paredes de la cisterna obtenidas en los modelos de elementos finitos de los tanques de sección circular y rectangular media, al aplicar una aceleración longitudinal senoidal a los tanques. Las fuerzas longitudinales en los fondos de la cisterna son muy similares, como se muestra en la Fig. 5.

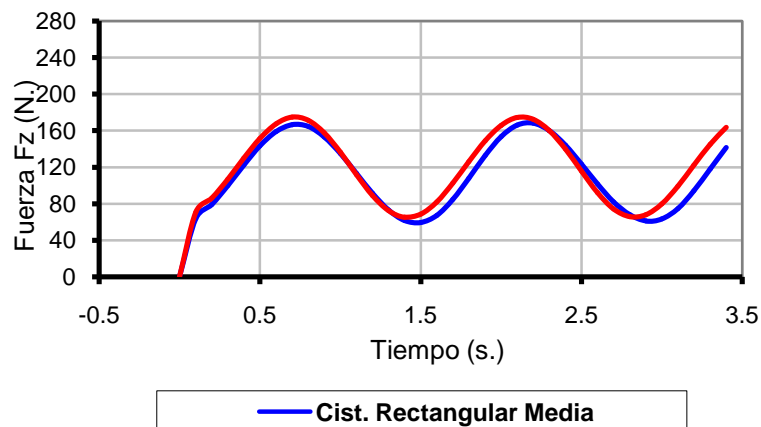


Fig. 5 Fuerza de reacción longitudinal

La primera frecuencia natural longitudinal también presenta una buena concordancia entre las secciones circular y rectangular media. Por ello, se ha empleado la sección rectangular media para calcular los parámetros que definen el modelo equivalente de Abramson [6]. A continuación se han resuelto las ecuaciones propuestas en [6], obteniéndose los valores de las incógnitas m_t , m_1 , m_0 , k_1 , l_1 , l_2 .

Estos valores se han empleado en el modelo mecánico equivalente que se ha incorporado al modelo del vehículo, a fin de analizar el comportamiento longitudinal del mismo. En las simulaciones realizadas, el líquido oscilaba longitudinalmente en el contenedor cisterna con una primera frecuencia natural de 0.64 Hz, la misma que se deduce de la ecuación de vibración libre un sistema masa-muelle con 1 gdl:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} = 0.64 \text{ Hz}$$

3.1.1. Contenedores cisterna con rompeolas verticales equidistantes

En una siguiente etapa, se ha analizado la influencia de los rompeolas sobre el movimiento de oleaje longitudinal. Los tanques estaban equipados con cuatro rompeolas equidistantes, que se han tratado como paredes rígidas que dividen el tanque en cinco compartimentos separados, cada uno lleno con la quinta parte de la carga líquida total. En el modelo completo se ha incorporado un modelo equivalente masa-muelle para cada compartimento, como puede verse en la Fig. 6.

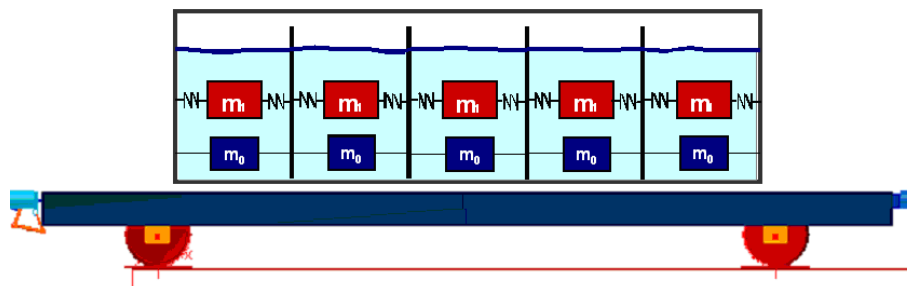


Fig. 6 Modelo de un contenedor cisterna con cinco compartimentos

Resolviendo las ecuaciones de Abramson de la misma forma que para la cisterna sin rompeolas, descrita en la sección 3.1, se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los compartimentos:

$$\begin{aligned}m_t^* &= m_t/5; & m_1^* &= m_1/5; & m_0^* &= m_0/5 \\k_1^* &= k_1/5 \\I_1^* &= I_1; & I_0^* &= I_0\end{aligned}$$

Puede verse que la fracción de líquido que se mueve dentro de cada uno de los cinco compartimentos oscila exactamente a la misma frecuencia que lo haría la carga líquida total en una cisterna sin rompeolas:

$$f_{\text{rompeolas}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_1^*}{m_1^*}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_1/5}{m_1/5}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} = 0.64\text{Hz}$$

Por tanto, los rompeolas verticales no alteran la primera frecuencia natural del movimiento del líquido contenido en cada compartimento, si bien reducen el impacto que este ejerce sobre los fondos de la cisterna o sobre los propios rompeolas.

4. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

El modelo final de SIMPACK está formado por vagones con contenedores-cisterna con un grado de llenado de hasta el 87 %. El modelo reducido de vehículo, descrito en el apartado 2.2, se ha usado para este análisis.

4.1. Maniobras de aceleración y frenado

Como ya se ha dicho, para estudiar la influencia de las maniobras de aceleración y frenado en línea recta, es preciso incorporar a cada uno de los vagones del modelo del tren el modelo longitudinal masa-muelle descrito en la sección 3.1.

Cuando la composición de cuatro vagones se somete a maniobras de frenado o aceleración en vía recta, aparte de cambiar la velocidad del tren, el líquido transportado se ve sometido a un movimiento de oleaje longitudinal. Este movimiento provoca un desplazamiento del centro de gravedad de la carga líquida hacia uno de los extremos de la cisterna. Ocasionalmente, este fenómeno puede conducir a descargas indeseadas de los ejes montados, si bien se ha observado en este análisis que la seguridad del tren no se ve afectada por esto. También se ha observado que bajo condiciones particulares, el tensor de enganche en reposo inicia un movimiento oscilatorio apreciable, que en casos severos puede conducir al desenganche indeseado de este elemento, que mantendría un movimiento pendular alrededor de su punto de fijación (fig. 7), con la posibilidad de golpear alguno de los componentes cercanos.

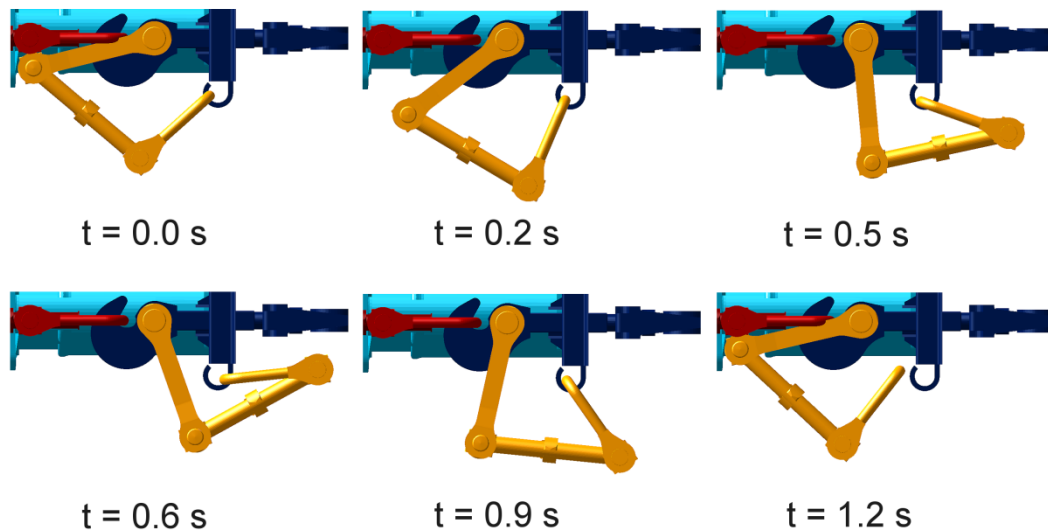


Fig. 7 Movimiento oscilatorio del tensor de enganche en reposo

4.1.1. Factores que favorecen el desenganche del tensor en reposo

Dado que una vez fuera de su alojamiento, el tensor de enganche en reposo podría golpear a los componentes cercanos, se continuó analizando este comportamiento en mayor profundidad. Se ha observado que la tendencia del tensor a desengancharse se incrementa para elevados valores de aceleración y desaceleración (por encima de 1m/s^2), y que depende también de la secuencia de aceleración y frenado; cuando a una frenada intensa le sigue un periodo de aceleración fuerte, las oscilaciones del tensor son mayores y es más probable que salte fuera del gancho. La velocidad del tren también influye en su comportamiento, aumentando las oscilaciones conforme lo hace la velocidad de circulación.

4.1.2. Influencia de la carga líquida

El fenómeno arriba citado del movimiento oscilatorio del tensor de enganche con grandes amplitudes se ha observado en las simulaciones cuando un tipo particular de líquido y grado de llenado se han empleado en combinación con cisternas de determinadas dimensiones. Por ejemplo, se han obtenido grandes oscilaciones para líquidos con una densidad cercana a la del agua y para grados de llenado en torno al 85 % en combinación con los contenedores analizados. Cuando se llenaron las cisternas con líquidos de diferentes características o cuando se modificó el grado de llenado, las oscilaciones del tensor no alcanzaron amplitudes tan altas, y este no llegó a saltar fuera de su alojamiento. Es por esto que se ha analizado hasta qué punto el movimiento longitudinal de oleaje del líquido dentro de las cisternas podría ser la causa de las grandes oscilaciones anteriormente observadas.

Al repetir las simulaciones sin carga líquida, el movimiento del tensor en reposo fue menos severo y no volvió a salirse de su alojamiento. También se ha observado el mismo comportamiento al reemplazar la carga líquida por otra sólida. Estas conclusiones refuerzan la hipótesis de que el movimiento longitudinal de oleaje pueda ser la causa del movimiento oscilatorio crítico del tensor.

En vista de los resultados anteriores, se analizó si se podría estar produciendo un fenómeno de resonancia. Al realizar un análisis modal se encontró que la primera frecuencia propia longitudinal del líquido era $f_{\text{líquido}} \approx 0.64 \text{ Hz}$, como ya

se había calculado con las ecuaciones de Abramson (sección 3.1). Para determinar la frecuencia de oscilación del tensor en reposo, se construyó un modelo en el que se reemplazó el líquido por un sólido de igual masa, suprimiendo así el oleaje del fluido. La frecuencia a la que oscilaba el tensor en reposo era $f_{\text{tensor}} \approx 0.7$ Hz, casi coincidente con la frecuencia natural del líquido. Se dedujo por tanto que, en efecto, el fenómeno de resonancia podría ser un factor importante en este comportamiento.

Al cambiar la frecuencia natural del líquido en los modelos, bien modificando las dimensiones de la cisterna o las propiedades del líquido, el tensor cesaba de saltar fuera de su alojamiento. En consecuencia, los autores consideran que este inesperado fenómeno puede atribuirse a efectos de resonancia originados por una particular combinación de las dimensiones del tanque y las propiedades del líquido.

4.1.3. Posibles soluciones

La resonancia observada en la ya descrita combinación de contenedor cisterna y carga líquida, conduce al desenganche de algunos tensores fuera de sus alojamientos. Una forma de evitar este indeseable pero no peligroso comportamiento es modificar la primera frecuencia natural del líquido, por ej. mediante un cálculo apropiado de las dimensiones de la cisterna o utilizando rompeolas apropiadamente diseñados a tal fin. Ya se vio en la sección 3.1.1 que los rompeolas verticales equidistantes, habitualmente empleados en cisternas, no alteran la frecuencia natural del líquido, y por tanto no resuelven esta problemática situación.

Otra solución más simple es cambiar la configuración del tensor en reposo de forma que el movimiento oscilatorio quede suprimido. La Fig. 8 muestra un tensor en reposo en configuración cerrada, que evita esta crítica oscilación.

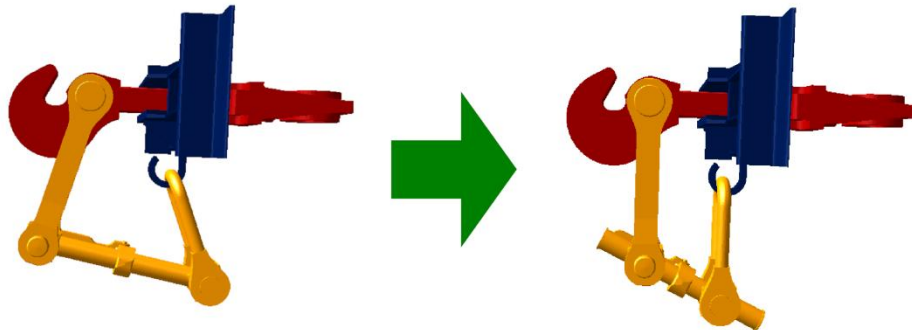


Fig. 8 Tensor de enganche en reposo con configuración “abierta” (izda.) y “cerrada” (dcha.)

El tensor de enganche se cierra apretando la tuerca situada en el centro de la barra inferior. Al acoplar los vagones, el tensor en reposo debería cerrarse hasta alcanzar la posición “cerrada” que se muestra en la Fig. 8. Sin embargo, a menudo sucede que estos tensores no se cierran completamente durante el enganche de los vagones. En las Figs. 9 y 10 se comparan las fuerzas de contacto que aparecen entre la brida del tensor en reposo y su gancho de alojamiento para ambas configuraciones, durante maniobras extremas de aceleración y frenado.

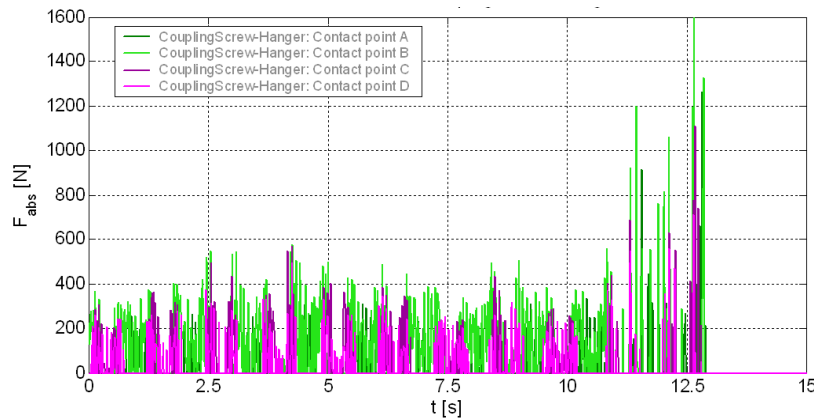


Fig. 9 Fuerzas de contacto en la posición “abierta”

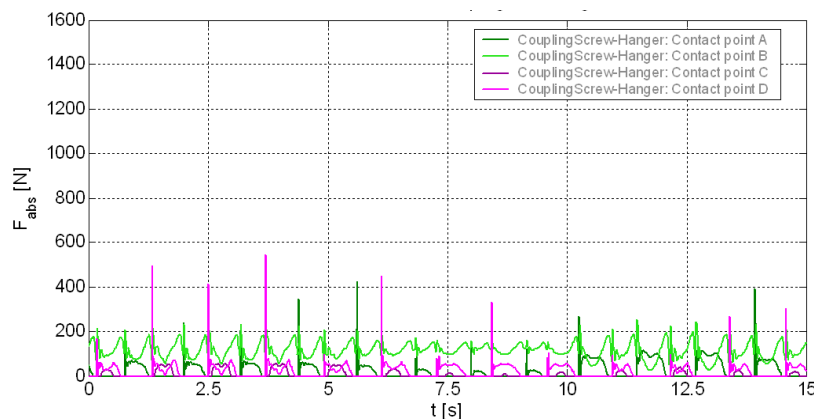


Fig. 10 Fuerzas de contacto en la posición “cerrada”

Puede apreciarse que las fuerzas de contacto eran considerablemente inferiores en el caso del tensor en reposo “cerrado”. Esto se debe a la oscilación menos violenta del mismo durante las maniobras de aceleración y frenado, dando lugar a menores impactos entre la brida del tensor y su alojamiento. En el caso del tensor “abierto”, se aprecia en la Fig. 9 que para $t \approx 12.8$ s este salta fuera de su gancho, anulándose así la fuerza de contacto entre la brida del tensor y el gancho de alojamiento.

En el caso del tensor con configuración “abierto”, se alcanzan también aceleraciones mucho mayores, asociadas con los grandes impactos que el tensor ejerce sobre el gancho de alojamiento.

5. CONCLUSIONES

Se ha modelado una composición de vagones de dos ejes para el transporte de líquidos en contenedores cisterna parcialmente llenos, con el programa de simulación de sistemas multicuerpo SIMPACK. Se ha observado en las simulaciones que el líquido transportado iniciaba un movimiento oscilatorio, denominado oleaje, cuando el tren era sometido a aceleraciones externas, tales como maniobras combinadas de tracción y frenado. Aunque este movimiento longitudinal del líquido no pone en peligro la seguridad de la circulación, se ha observado que los tensores de enganche en reposo entraban en resonancia con la primera frecuencia natural asociada al oleaje, llevando al indeseado, aunque no peligroso, desenganche de algunos de estos elementos. Se han sugerido también algunas soluciones para evitar este problema de resonancia, que tiene lugar en trenes de mercancías con

una particular combinación de factores, como las dimensiones de los contenedores, el tipo de líquido puesto en movimiento, los patrones de frenado y tracción, etc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen encarecidamente al operador ferroviario Renfe Operadora por su cooperación y apoyo durante la realización de este proyecto. Nuestro especial agradecimiento a D. Antonio Albadalejo (Renfe Operadora, UN Mercancías), D. Vicente Cano y D. Marco Rodríguez (ambos de Renfe Operadora, UN Mantenimiento Integral de Trenes). Gracias también a Oscar García, por sus contribuciones a este trabajo como resultado de su proyecto de fin de carrera.

REFERENCIAS

1. RID - Reglamento Relativo al Transporte Internacional por Ferrocarril de Mercancías Peligrosas. Ministerio de Fomento. Madrid 2003.
2. Stichel, S. How to Improve the Running Behavior of Freight Wagons with UIC-Link Suspension. Vehicle System Dynamics, Suppl. 33, pp. 394-405, 1999.
3. Salem, M. I., Mucino, V. H., Gautam, M. and Aquaro, M. Review of Parameters Affecting Stability of Partially Filled Heavy-Duty Tankers. Society of Automotive Engineers (SAE), Technical Paper No. 1999-01-3709, 1999.
4. Ranganathan, R., Ying, Y. and Miles, J. B. Analysis of Fluid Slosh in Partially Filled Tanks and Their Impact on the Directional Response of Tank Vehicles. Society of Automotive Engineers (SAE), Technical Paper No. 932942, 1993.
5. Ranganathan, R., Ying, Y. and Miles, J. B. Development of a Mechanical Analogy Model to Predict the Dynamic Behavior of Liquids in Partially Filled Tank Vehicles. Society of Automotive Engineers (SAE), Technical Paper No. 942307, 1994.
6. Abramson, H. N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers – With Applications to Space Vehicle Technology. NASA SP-106, National Aeronautics and Space Administration, 1966.
7. Budiansky, B. Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks. Journal of the Aero/Space Sciences, Vol. 27, No. 3, 1960.